

FUENTE Y MOMENTO DE APLICACIÓN DE NITRÓGENO EN MAÍZ BAJO SIEMBRA DIRECTA EN BALCARCE

LUCAS EMMANUEL BONELLI¹, HERNÁN RENÉ SAINZ ROZAS^{1,2},
HERNÁN EDUARDO ECHEVERRÍA¹, PABLO ANDRÉS BARBIERI^{1,2*}

Recibido: 18/07/2017

Recibido con revisiones: 21/10/2017

Aceptado: 21/10/2017

RESUMEN

Realizar la fertilización con nitrógeno (N) luego de la emergencia del cultivo de maíz (*Zea mays* L.) es una práctica de manejo orientada a sincronizar la oferta con la demanda del nutriente, con el fin de incrementar la absorción y reducir la susceptibilidad a pérdidas. Sin embargo, el incremento de temperatura del suelo en la medida que se demora el momento de aplicación haría que las pérdidas por volatilización de N como amoníaco (NH_3) se vuelvan importantes, disminuyendo la eficiencia de recuperación del fertilizante (ERN) y, en consecuencia, el rendimiento del cultivo. El objetivo de este trabajo fue evaluar el efecto de la aplicación de N en distintos momentos sobre la ERN y el rendimiento en grano y probar si fuentes de N con menor potencial de volatilización que la urea resultan mejores para aplicaciones tardías. Para ello, en Balcarce ($37^\circ 45' \text{ S}$, $58^\circ 18' \text{ W}$; 130m SNM) se condujeron dos ensayos de maíz bajo siembra directa durante dos campañas agrícolas. Los tratamientos consistieron en una única aplicación de 80 kg N ha^{-1} en superficie durante tres momentos fenológicos (siembra, V_6 y V_{10}) desde cuatro fuentes de N (urea, UAN, UAN+T y CAN). El momento de aplicación del N a la siembra o en los estadios V_6 y V_{10} no produjo modificaciones en el rendimiento ni en la ERN. Además el empleo de fuentes de N con menor potencial de pérdida por volatilización no mejoró los resultados obtenidos con urea. Esto fue consecuencia de la ocurrencia de precipitaciones que incorporaron el N en el perfil del suelo. Para las condiciones edafoclimáticas de Balcarce, la fertilización con N puede demorarse sin afectar el status nitrogenado del cultivo hacia el período crítico, aun cuando se emplean fuentes de N con alto potencial de volatilización como la urea.

Palabras clave: Volatilización, eficiencia de recuperación de N

NITROGEN SOURCE AND APPLICATION TIME FOR NO-TILL MAIZE IN BALCARCE

ABSTRACT

Nitrogen (N) fertilization after maize (*Zea mays* L.) emergence contributing to synchronize N supply with plant N demand. However under no-tillage management this practice can increase ammonia (NH_3) volatilization losses, reducing N-recovery efficiency (NRE) and crop yield. The objective of this work was to evaluate the effect of N-sources (with different NH_3 potential loss) applied at different times, on NRE and crop yield. Two no-till maize field experiments were conducted at Balcarce ($37^\circ 45' \text{ S}$, $58^\circ 18' \text{ W}$; 130m ASL) on a soil complex of Typic Argiudoll and Petrocalcic Paleudoll during two growing seasons. Treatments consisted in a single broadcast application of 80 kg N ha^{-1} from four N-sources (urea, UAN, UAN+T and CAN) at three different developmental stages of crop (Sowing, V_6 and V_{10}). There was no difference on NRE and crop yield when N applications were delayed from sowing to V_6 and V_{10} . In addition, N-sources with less NH_3 volatilization potential did not show better performance than urea. This behavior was consequence by the occurrence of rainfall events that incorporated N into soil depth. These results suggest that under these soils and climate conditions, N-fertilization can be delayed for no-till corn, without affecting nitrogen crop status during the critical period, even when N-sources like urea are used.

Key words: Volatilization, N recovery efficiency

¹ Unidad Integrada Balcarce: EEA INTA - FCA UNMP

² CONICET

* Autor de contacto: barbieri.pablo@inta.gob.ar

INTRODUCCIÓN

Los suelos de aptitud agrícola del sudeste bonaerense se caracterizan por poseer reacción moderadamente ácida, bajas concentraciones de sales y fósforo disponible, y elevados contenidos de materia orgánica (MO) que disminuyen gradualmente desde el Este hacia el Oeste (Echeverría & Ferrari, 1993). La intensificación del uso agrícola de estos suelos ha hecho disminuir notablemente los niveles de MO y con ello la productividad (Studdert et al., 1997, Sainz Rozas et al., 2011). En este sentido, la práctica de manejo generalmente denominada como siembra directa (SD) se ha presentado como una herramienta promisoriosa para reducir las pérdidas o incrementar los niveles de MO (Díaz Zorita et al., 2002; Studdert y Echeverría, 2002). En los últimos años la superficie agrícola bajo SD ha crecido notablemente alcanzando a nivel país el 90% de la superficie en la campaña 2014/15 (AAPRESID, 2015). En el sudeste bonaerense se observa la misma tendencia llegando a cubrir en la zona hasta el 75% del área sembrada.

Los suelos bajo SD acumulan residuos vegetales sobre la superficie, reducen la erosión y mejoran la economía del agua de los cultivos (Blevins & Frye, 1993; Domínguez et al., 2001). Sin embargo, bajo SD también se afecta la dinámica de algunos nutrientes, pudiendo disminuir la disponibilidad de N para los cultivos debido a las menores tasas de mineralización y a procesos de inmovilización y/o pérdidas (Echeverría & Saiz Rozas 2015). Por lo tanto, en estos sistemas se deben aplicar mayores dosis de fertilizantes nitrogenados para lograr los máximos rendimientos (Domínguez et al., 2001).

La inclusión de maíz (*Zea mays* L.) en sistemas de agricultura continua bajo SD es una alternativa viable para mejorar el balance de carbono de los suelos, debido la alta productividad de biomasa y, consecuentemente, al elevado aporte de residuos que genera (Studdert & Echeverría, 2000). La intensificación de la agricultura y la utilización de variedades de mayor potencial productivo, entre otros factores, han incrementado las dosis de fertilizantes, especialmente con nitrógeno (N). El N es el nutriente que en mayor medida condiciona el crecimiento y rendimiento de los cultivos

(Echeverría y Sainz Rozas, 2015). El N debe estar bien provisto en cantidad y oportunidad como para asegurar un óptimo estado fisiológico de los cultivos durante el periodo crítico, momento en los cuál se define el rendimiento de los mismos. Para el cultivo de maíz en el sudeste bonaerense, se ha puesto en evidencia la menor provisión de N bajo SD, respecto de labranza convencional, independientemente de la historia agrícola (Domínguez, et al., 2001). Pudiendo atribuirse este comportamiento a una disminución en la mineralización (Rice et al., 1986) y a aumentos en las pérdidas por desnitrificación, lavado de nitrato en profundidad y volatilización de amoníaco desde los fertilizantes y/o por inmovilización microbiana (Fox & Bandel, 1986; Echeverría y Sainz Rozas, 2015). Por lo tanto, bajo SD se requieren dosis mayores de fertilizantes nitrogenados para la obtención de similares rendimientos que bajo labranza convencional (Domínguez et al., 2001). El elevado costo y la gran demanda de N del cultivo (aproximadamente 20 kg de N por tonelada de grano) (Andrade et al., 2000b), incentivan el desarrollo de prácticas de fertilización que apunten al logro de una alta eficiencia de uso del N aportado por fertilización.

Normalmente, bajo SD los fertilizantes nitrogenados son aplicados sobre la superficie del suelo. En estas condiciones, las fuentes de N que contienen urea, pueden resultar menos eficientes debido a las pérdidas por volatilización bajo la forma de amoníaco (NH_3) (Barbieri et al., 2003, Sainz Rozas et al., 2004, Barbieri et al., 2017). Con el objetivo de reducir éstas pérdidas algunos trabajos proponen la incorporación de la urea debajo de los rastrojos (Barbieri et al. 2003). Otra propuesta es la de utilizar fuentes de N con menor potencial de volatilización como nitrato de amonio, nitrato de amonio calcáreo (CAN) y las mezclas líquidas tales como la de urea y nitrato de amonio en solución (UAN) y de UAN con tiosulfato de amonio (UAN+T) (García et al., 1999). Barbieri et al. (2003) demostraron que la incorporación de urea debajo de los rastrojos y la aplicación de CAN en superficie son dos prácticas igualmente eficientes para evitar las pérdidas por volatilización que se producen cuando se aplica urea en superficie.

En condiciones no limitantes, el cultivo de maíz alcanza la máxima tasa de acumulación de N en el período que transcurre entre el estadio V_{5-6} y los 15-20 días después de floración (Russelle et al., 1983; Uhart & Andrade, 1995). Por tal razón, numerosos trabajos sustentan la posibilidad de retrasar las aplicaciones de N a momentos posteriores a la siembra con el objetivo de lograr una mayor sincronía entre la oferta y la demanda de N (Scharf et al., 2002; Sainz Rozas et al., 2004). Así, es posible disminuir los riesgos de pérdidas de N por lavado y desnitrificación que ocurren al inicio de la estación de crecimiento por la alta humedad del suelo (Echeverría et al., 2015). No obstante, la ERN para las aplicaciones en V_6 no superan el 55-61% del N aplicado (Echeverría & Sainz Rozas, 2001). Esta baja ER sugiere que aún existiría margen para mejorarla con aplicaciones de N posteriores a dicho estadio.

La demora en las aplicaciones de N en maíz, no obstante, puede generar un incremento de las pérdidas por volatilización debido a la mayor temperatura que presenta el suelo. Las pérdidas por volatilización son más elevadas cuando las temperaturas del suelo se incrementan en un rango de 10 a 50°C (Hargrove, 1988). Por ende, cuando el fertilizante es aplicado a la siembra o en V_6 , se producirán pérdidas variables de N como consecuencia de cambios en la temperatura del suelo. Evaluaciones realizadas en Rafaela (región central de la provincia de Santa Fe, Argentina) mostraron pérdidas de N por volatilización del 36% para aplicaciones de urea sobre superficie en V_6 bajo SD (Fontanetto & Keller, 2006). Mientras que en maíces tardíos, en Rafaela y Pergamino, las pérdidas fueron de hasta el 40% (Fontanetto 2002, Ferraris et al., 2015). Para Balcarce (SE Bonaerense), se han determinado pérdidas por volatilización inferiores al 15% (Sainz Rozas et al., 1997) y escasas o nulas diferencias en rendimiento y eficiencia de uso de N (EUN, kg grano kg N aplicado⁻¹) (Sainz Rozas et al., 1999). La menor temperatura y la mayor capacidad buffer de los suelos del SE Bonaerense estarían explicando las diferencias observadas entre localidades. Sin embargo, para Balcarce, aún no se dispone de información sobre aplicaciones de N en estadios posteriores a V_6 . En tales situaciones sería factible

la ocurrencia de mayores pérdidas de N por volatilización debido a la mayor temperatura de suelo.

En este trabajo se planteó como hipótesis que la aplicación de N en V_{10} junto con la utilización de fuentes de N con menor potencial de volatilización resulta en una mayor absorción de N por el cultivo y un mayor rendimiento respecto de las demás combinaciones de fuentes y momentos de aplicación. Los objetivos del presente trabajo fueron: 1. Evaluar la respuesta a la fertilización nitrogenada para diferentes fuentes y momentos de aplicación de N, 2. Evaluar la absorción de N bajo fertilización nitrogenada con diferentes fuentes de nitrógeno y momentos de aplicación y 3. Analizar la eficiencia de recuperación de N para diferentes fuentes de N y momentos de aplicación

MATERIALES Y MÉTODOS

Se realizó un experimento durante dos campañas agrícolas en la Estación Experimental del Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA) Balcarce (37° 45' S, 58° 18' W; 130m SNM). El suelo tenía prolongada historia agrícola y estaba conformado por un complejo de Argiudol Típico y Paleudol Petrocálcico. El cultivo antecesor en ambas ensayos fue trigo (*Triticum aestivum* L.) cultivado bajo SD, cuyos residuos presentaron una relación C:N promedio de 38:1. Algunas características del suelo al inicio de cada ensayo son presentadas en la **Tabla 1**.

Tabla 1. Algunas características de los suelos a la siembra del cultivo de maíz.

Table 1. Some soil characteristic at showing maize.

Año	P-Bray	N-NO ₃ ⁻ (0-60 cm)	pH	MO
	mg kg ⁻¹	kg ha ⁻¹		g kg ⁻¹
1	15,7	83,5	5,4	53
2	10,9	39,1	5,8	57

En ambas campañas, el diseño experimental fue en bloques completos aleatorizados (3 repeticiones) con arreglo en parcelas divididas. El experimento incluyó dos factores: i) tres momentos de aplicación de N (parcela principal): siembra y estadios de seis y diez hojas expandidas (V_6 y V_{10} , respectivamente Ritchie & Hanway, 1982), y

ii) cuatro fuentes de N (subparcela): Urea (46% N), Urea + Nitrato de amonio en solución (UAN, 32% N), Urea + Nitrato de amonio + Tiosulfato de amonio en solución (UAN+T, 28% N - 5,6% S) y Nitrato de amonio calcáreo (CAN, 27% N). Las unidades experimentales fueron parcelas de 10 metros de largo por 3.5 m de ancho (35 m²). La dosis de N fue de 80 kg ha⁻¹ que permite maximizar los rendimientos del cultivo de maíz (Barbieri et al., 2008), además se incluyó una parcela testigo (sin fertilización nitrogenada). En todos los tratamientos, el fertilizante se aplicó sobre la superficie del suelo. Las fuentes de formulación granulada (Urea y CAN) fueron dispersados a mano en cobertura total a la siembra y en cobertura en el entresurco en los estadios de V₆ y V₁₀. Las fuentes líquidas (UAN y UAN+T) fueron chorreadas con un aspersor manual a presión en el centro de los entresurcos.

En ambas campañas la siembra del cultivo de maíz se realizó la segunda quincena de octubre. La densidad de plantación fue de 7,9 plantas m⁻² con un espaciamiento entre hileras de 70 cm. A la siembra se fertilizó con 120 kg ha⁻¹ superfosfato triple de calcio y 15 kg ha⁻¹ de azufre (SO₄Ca), para que fósforo y azufre no fuesen limitantes en el crecimiento del cultivo. Las parcelas se mantuvieron libres de malezas, plagas animales y enfermedades fúngicas, mediante la aplicación de productos agroquímicos recomendados para la zona.

Al momento de aplicación de los tratamientos, se determinó la cantidad de los residuos (kg ha⁻¹), la cobertura de los mismos (%CR) y la humedad del suelo de 0-20 cm de profundidad (cm³ agua cm³ suelo⁻¹) (**Tabla 2**).

En floración (R1, Ritchie & Hanway, 1982) se realizaron estimaciones del status nitrogenado del cultivo mediante el uso del medidor de clorofila Minolta SPAD-502 (Konica Minolta Sensing, Inc, Osaka, Japón). De cada parcela se tomaron 10 plantas al azar efectuando tres mediciones por planta en la hoja que envuelve la espiga principal.

Antes de cada momento de aplicación (V₆ y V₁₀) y en madurez fisiológica se colectaron diez plantas de cada parcela, cortándolas a nivel del suelo para determinar biomasa aérea y contenido de N en planta. En madurez fisiológica, además, se cosecharon las espigas de 12 metros lineales totales (8,4 m²) tomando los 3 surcos centrales de cada parcela para la determinación del rendimiento en grano. Los rendimientos en grano y biomasa fueron corregidos y expresados en base seca (0% de humedad). El material vegetal recolectado se secó a 60 °C en estufa hasta peso constante y una fracción de las muestras fue molida y tamizada (0,84 mm de malla) para determinar la concentración de N total. Ésta se determinó por combustión seca mediante el método de Dumas, para lo cual se utilizó un analizador LECO TruSpec. El N total acumulado resultó del producto entre la concentración de N y el peso seco de cada fracción (planta entera y grano).

Se calculó la eficiencia de recuperación de N del fertilizante como la relación entre el N absorbido en el tratamiento fertilizado menos el del testigo y la cantidad de N aplicada en fertilizante ($ERN = (N_{\text{abs fertilizado}} - N_{\text{abs testigo}}) / 80 \text{ kg N ha}^{-1}$).

El análisis de la varianza fue realizado usando el procedimiento GLM incluido en las rutinas del

Tabla 2. Condiciones del suelo al momento de aplicación de tratamientos para ambas campañas.

Table 2. Soils conditions at treatment application time for two growing seasons.

	Siembra				V ₆				V ₁₀			
	Residuos		H	Tº	Residuos		H	Tº	Residuos		H	Tº
	kg ha ⁻¹	%CR			kg ha ⁻¹	%CR			kg ha ⁻¹	%CR		
Año 1	5966,1	83,6	32,2	21,9	5546,2	87,2	36,3	24,9	5128,6	63,3	36,7	27,8
Año 2	4857,8	90,6	29,8	16,64	3961,9	82,2	27,1	29,8	3976,2	81,1	17,1	25,7

Cantidad de residuos presentes en kg ha⁻¹, %CR= porcentaje de suelo cubierto con residuos, H = humedad (cm³ agua/cm³ suelo) de los primeros 20 cm del perfil y Tº = temperatura del suelo a 5 cm de profundidad (°C).

Plant residues kg ha⁻¹, %CR= percent to soil cover with plant residues, Hº =soil water content at 20 cm soil depth (cm³ water/cm³ soil) and Tº = soil temperature at 5 cm soil depth

Statistical Analysis Systems (SAS) (SAS Institute Inc, 2008). Las medias de tratamientos fueron comparadas usando el test de LSD ($\alpha=0,05$) cuando el análisis de la varianza indicó efecto significativo de los tratamientos o su interacción.

RESULTADOS

Rendimiento en grano

En ambos años, el rendimiento del cultivo no fue afectado por la interacción entre momento de aplicación y fuente de N y (Tabla 3). La postergación de la aplicación de N desde la siembra hasta los estadios de V_6 y V_{10} no afectó el rendimiento del cultivo. La fuente de N tampoco afectó el rendimiento del cultivo (Tabla 3), Las fuentes UAN, UAN+T y CAN, con menor potencial de volatilización mostraron un comportamiento similar al de la urea en los tres momentos de fertilización (Tabla 3). Por otra parte, sólo en el Año 2 se determinó diferencias significativas entre los tratamientos fertilizados con respecto al testigo sin fertilización nitrogenada (Tabla 3). Durante el pe-

ríodo crítico de determinación de número de granos (30 días centrados en floración) se efectuaron riegos por aspersión con el objetivo de que la tasa de crecimiento del cultivo no sea limitada por la disponibilidad de agua. No obstante, en ambas campañas la disponibilidad de agua durante el período crítico (Figura 1) se encontró por debajo del 80% del agua útil esto pudo haber afectado el rendimiento el cultivo.

Nitrógeno absorbido y contenido de clorofila

En ambas campañas, no se determinó interacción significativa ($p>0,05$) entre momentos de aplicación y fuentes de N para el N total absorbido en madurez fisiológica (NTA). Por otra parte, el NTA en los tratamientos con N fue superior al del testigo ($p<0,05$) en ambas campañas (Figura 2 A y B). Aunque en el primer año se observó una tendencia a una mayor acumulación de N para la aplicación en V_{10} , el NTA fue similar ($p>0,05$) para los cultivos fertilizados con N en diferentes momentos (Figura 2 A). En correspondencia, las

Tabla 3. Rendimiento en grano (kg ha^{-1}) del cultivo de maíz del tratamiento Testigo (sin fertilizar) y de los fertilizados (momento de aplicación y fuente de N).

Table 3. Maize grain yield (kg ha^{-1}) from control (without fertilization) and from fertilized treatments (application time and N source).

Año	Momento	Fuente			
		UREA (kg ha^{-1})	UAN	UAN+T	CAN
1	Siembra	9346	9368	8480	8954
	V_6	8740	8982	9468	9197
	V_{10}	9720	9827	9114	9562
	Medias Fuente DMS = 576	9269	9393	9021	9238
Media general (con N) 9230 Testigo (sin N) 8548					
2	Siembra	6088	6464	5825	6703
	V_6	5998	6433	6230	6000
	V_{10}	6240	6139	6013	6124
	Medias Fuente DMS= 517	6109	6346	6023	6276
Media general (con N) 6151 Testigo (sin N) 5706					

DMS: diferencia mínima significativa $\alpha=0,05$.

DMS: least significant difference $\alpha=0.05$.

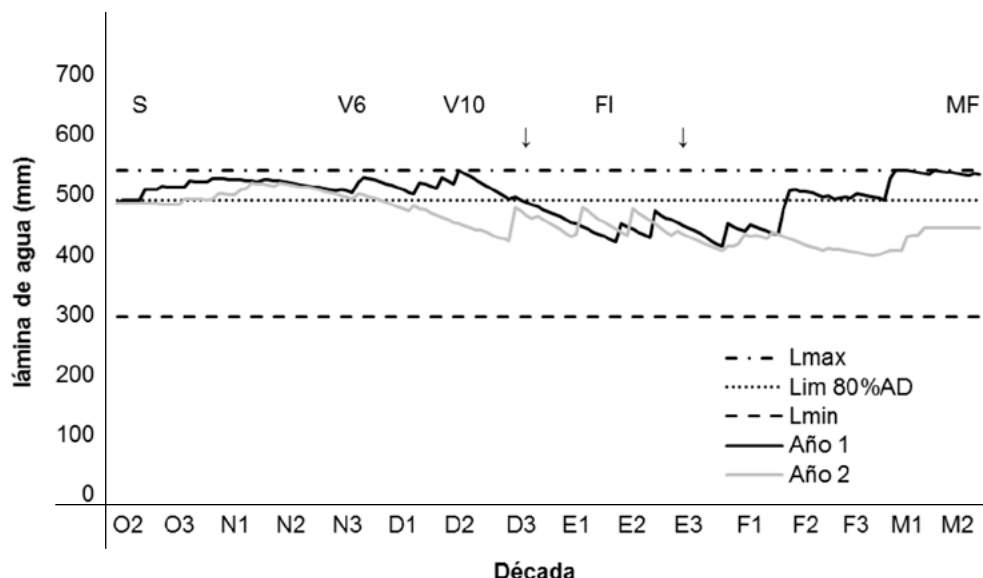


Figura 1. Lámina de agua disponible en el suelo. En el eje horizontal se indican las décadas mensuales de octubre a marzo. S=siembra, V6 y V10= 6 y 10 hojas desplegadas, Fl=floración, MF= madurez fisiológica. Las líneas punteadas horizontales indican de arriba hacia abajo: límite máximo, 80% de agua útil y límite mínimo de almacenaje de agua. Las flechas indican comienzo y fin del período crítico para definición de rendimiento.

Figure 1. Available soil water. Horizontal axe indicate monthly decadal from October to March. S=showing, V6 y V10= 6 and 10 full leaf, Fl=flowering, MF= physiological maturity. Horizontal dotted lines indicate from top to bottom: maximum limit, 80% water use and minimum limit to storage water. Arrows indicate critical period to kernel set

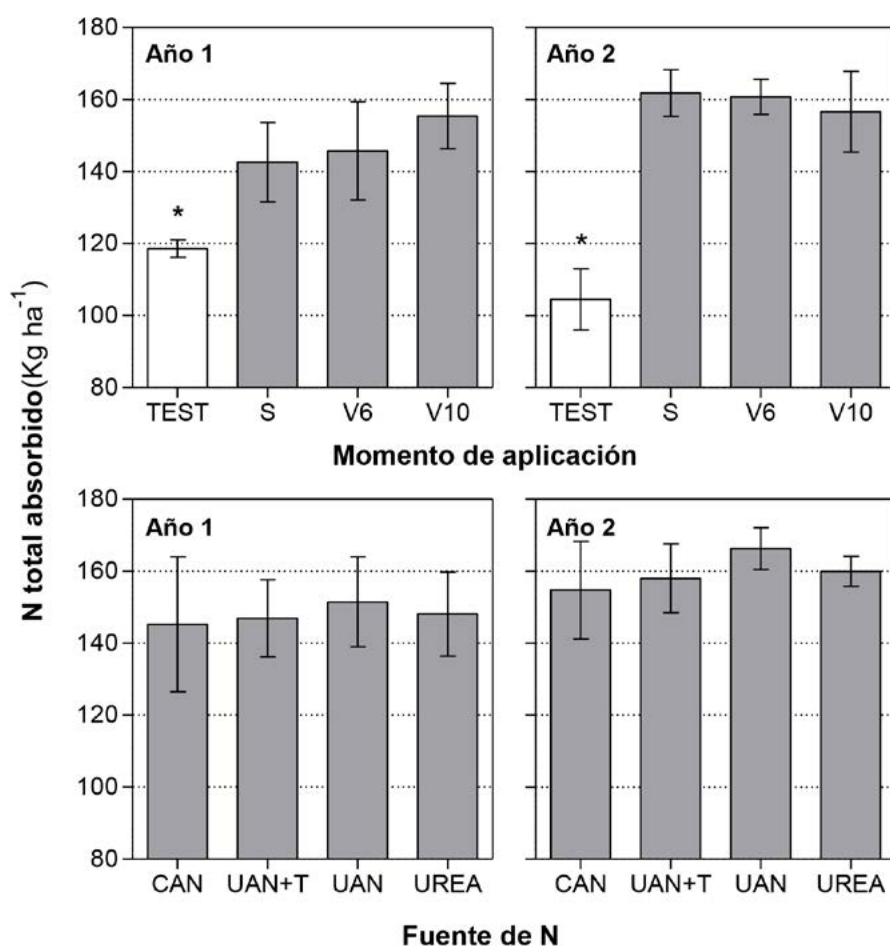


Figura 2. Nitrógeno total absorbido en plantas de maíz (kg ha^{-1}) en madurez fisiológica según el momento de aplicación y la fuente de N. Datos de dos años de experimentos conducidos en Balcarce. Las barras verticales indican el intervalo de 95% de confianza para cada media. * Indica diferencias significativas.

Figure 2. Total nitrogen uptake by maize plants (kg ha^{-1}) at physiological maturity affected by N application moment and N source. Experimental data from two years at Balcarce. Vertical bars indicate 95% confidence interval. * Indicate significant differences

diferentes fuentes de N resultaron en similares valores de NTA ($p > 0,05$) (**Figura 2 B**).

El contenido de clorofila en floración fue similar ($p > 0,05$) en todos los tratamientos con N para ambas campañas. No hubo interacción ni efecto individual del momento de aplicación y la fuente de N (**Figura 3 A y B**). No obstante la diferencia fue significativa ($p < 0,05$) cuando se compararon los tratamientos fertilizados con el testigo (**Figura 3**). La fertilización con N, tanto en aplicaciones tempranas como tardías, produjo índices de verdor superiores al umbral de respuesta (Uhart & Echeverría, 2000) (**Figura 3**. línea punteada), mientras que los testigos de ambas campañas tuvieron índices de verdor inferiores. Esto indica que aún en el Año 2, el N aplicado en V10 pudo ser absorbido por la planta, a pesar de la menor oferta hídrica para el cultivo (**Figura 1**).

Eficiencia de recuperación de N

En ambos años, la ERN no fue afectada por la interacción entre momento de aplicación y fuente de N. al igual que lo determinado para el rendimiento, la ERN no fue afectada por el momento de aplicación o la fuente de N (**Tabla 4**). El promedio de ERN fue de 37 y 53% para el Año 1 y 2,

respectivamente. La menor ERN para el Año 1 podría ser explicada por la mayor disponibilidad de agua y de N (**Figura 1; Tabla 1**).

DISCUSIÓN

Las precipitaciones durante la estación de crecimiento del primer año fueron similares a las del registro histórico, mientras que en el segundo año las lluvias fueron notablemente inferiores (6 y 309,1 mm por debajo de la mediana histórica para el Año 1 y 2, respectivamente). En el Año 1, el cultivo dispuso de una lámina de agua útil mayor al 80% durante gran parte de la estación de crecimiento (**Figura 1**). En cambio, para el Año 2 el contenido de agua útil fue inferior al 80% y se mantuvo por debajo de ese nivel, desde la primera década de diciembre hasta el final de la estación de crecimiento. Esto podría explicar los menores rendimientos obtenidos en el Año 2 debido a los efectos negativos de la menor disponibilidad hídrica sobre el crecimiento y la generación de rendimiento de los cultivos (Andrade et al., 2000a). La respuesta en rendimiento a la aplicación de N fue significativa solamente en el Año 2, esto sería consecuencia de la menor oferta inicial de N (**Tabla 1**). Además, la menor disponibilidad hídrica durante el ciclo del cultivo (**Figura 1**) pudo haber

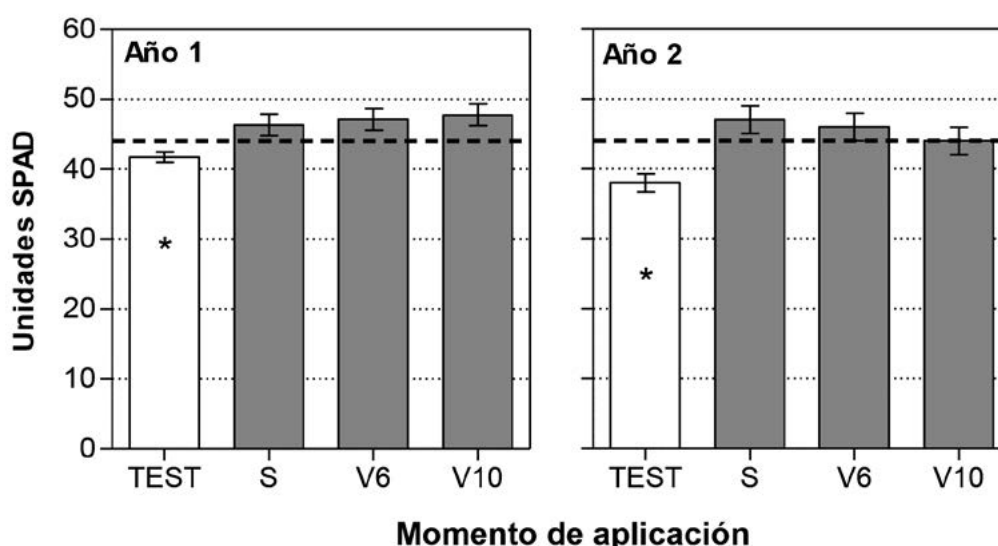


Figura 3. Índice de verdor (unidades Spad) durante floración (aparición de estigmas) para el testigo y los diferentes momentos de aplicación de N. La línea punteada representa el umbral de respuesta a la fertilización nitrogenada (Uhart y Echeverría, 2000). Las barras verticales indican el intervalo de 95% de confianza para cada media. * Indica diferencias significativas.

Figure 3. Green index (Spad units) during flowering (silking) for control and N application time treatments. Dotted lines indicate threshold response value to nitrogen fertilization (Uhart y Echeverría, 2000). Vertical bars indicate 95% confidence interval. * Indicate significant differences.

afectado la mineralización de N. Por otra parte, la falta de respuesta en el Año 1 sería debido a la mayor disponibilidad de N inicial (**Tabla 1**) y a que las mejores condiciones de humedad de suelo produjeron una mayor la mineralización de N desde la MO. La diferencia en la mineralización de N entre años puede observarse a través del N total absorbido en planta por los tratamientos testigos (**Figura 2**).

Las fuentes de N evaluadas difieren en su composición, no obstante una vez que se incorporan al suelo los microorganismos las convierten a la forma de N como nitrato en pocos días (Navarro et al, 1980). Por consiguiente, cuando ningún factor del suelo limita el proceso de nitrificación (i.e valores extremos de pH, anaerobiosis, etc.), las pérdidas de N por lavado y/o desnitrificación serían equivalentes para todas las fuentes de N, debido a la similar disponibilidad de nitrato (Echeverría & Sainz Rozas, 2015). Sin embargo, cuando las condiciones son adecuadas para la ocurrencia de volatilización sólo las fuentes que contienen una alta proporción de urea son propensas a esta pérdida. Así, la diferencia esperable en absorción de N entre las fuentes, sería atribuida a su diferente potencial de volatilización, tal como lo señalan Barbieri et al (2003).

El rendimiento y la absorción de N de los tratamientos fertilizados con urea fueron similares para los tres momentos de aplicación, a pesar de que en las aplicaciones en $V_6 - V_{10}$, el potencial de pérdida de N por volatilización sería mayor. Esto sugiere que las pérdidas por volatilización fueron muy bajas y similares entre tratamientos para las condiciones en las cuales se realizaron estos ensayos. Puede especularse que el bajo potencial de pérdidas por volatilización es consecuencia de las características del suelo y del clima de Balcarce durante el inicio de la estación de crecimiento del cultivo de maíz. El clima durante el inicio de la estación de crecimiento se caracteriza por bajas temperaturas y alta probabilidad de lluvias. La alta capacidad buffer de los suelos de Balcarce (debido a su textura fina y su alto porcentaje de MO) tiene el potencial de amortiguar los cambios bruscos de pH producidos por la hidrólisis de urea. Sumado a lo anterior, la dosis de N aplicada (dosis que normalmente aplican los productores

de la zona) es baja comparada con aquellas probadas por Sainz Rozas et al (1997) (140 y 210 kg N ha⁻¹) bajo las cuales se observaron pérdidas significativas por volatilización para aplicaciones en V_6 de urea en superficie.

La ocurrencia de lluvias posteriores a la aplicación de N en superficie disminuye los riesgos de pérdidas por volatilización. Fox & Bandel (1986) encontraron una alta relación entre las pérdidas de N por volatilización y los días desde la aplicación hasta la ocurrencia de una lluvia mayor a 10 mm para los primeros 6 días desde la fertilización. En ambos años, las aplicaciones de N en V_6 y V_{10} fueron incorporadas al suelo por una lluvia en no más de dos días luego de la fertilización, con lo cual la mayor parte de la hidrólisis ocurrió dentro del suelo y no sobre la superficie. En la **Figura 4** se presenta la probabilidad decádica para la ocurrencia de precipitaciones capaces de incorporar el N aplicado (> 10 mm) en superficie durante el inicio de la estación de crecimiento. Para cultivos de maíz sembrados en fecha óptima (10 a 15 de octubre), los estadíos de V_6 y V_{10} ocurren durante la tercera década de noviembre y la segunda de diciembre. Como se observa, la probabilidad de que una lluvia incorpore al suelo la urea es alta y similar durante éste período del año.

En ambos años, el NTA no fue diferente entre momentos de fertilización ni fuentes de N (**Figura 2**), esto sería consecuencia de que la dinámica de N fue similar entre fuentes. En consecuencia, se determinó similar comportamiento para la ERN (**Tabla 4**). De manera similar, el contenido de clorofila determinado en floración mostró que no hubo diferencia en el status nitrogenado del cultivo entre tratamientos de fertilización (**Figura 3**). Todos los tratamientos con N mostraron valores de Spad mayores a 43,3 unidades, umbral por encima del cual no se esperaría respuesta a la fertilización (Uhart & Echeverría, 2000). Esta observación concuerda con lo reportado por Scharf et al. (2002) quienes afirman que, aun con aplicaciones en superficie siempre y cuando el N se incorpore al suelo, la fertilización puede demorarse hasta V_{11} sin pérdidas evidentes de rendimiento; aún bajo severas situaciones de estrés. Esto indica que también es posible la refertilización

Tabla 4. Eficiencia de recuperación de nitrógeno (ERN = kg de N absorbido del fertilizante / kg de N aplicado) según momentos de fertilización y fuentes de N.

Table 4. Nitrogen recovery efficiency (ERN = kg N uptake from fertilized / kg N applied) affected by application time and N sources.

Año	Momento	Fuente				
		UREA	UAN	UAN+T	CAN	
		ERN (kg N kg ⁻¹ N)				
1	Siembra	0,38	0,32	0,22	0,28	Medias Momento DMS=0,20 0,30
	V ₆	0,33	0,34	0,45	0,24	0,34
	V ₁₀	0,40	0,57	0,39	0,48	0,46
	Medias Fuente DMS = 0,15	0,37	0,41	0,35	0,33	
2	Siembra	0,58	0,69	0,53	0,42	Medias Momento DMS=0,27 0,56
	V ₆	0,53	0,62	0,53	0,50	0,54
	V ₁₀	0,48	0,52	0,47	0,48	0,49
	Medias Fuente DMS= 0,19	0,53	0,61	0,51	0,47	

DMS: diferencia mínima significativa $\alpha=0,05$.
DMS: least significant difference $\alpha=0.05$.

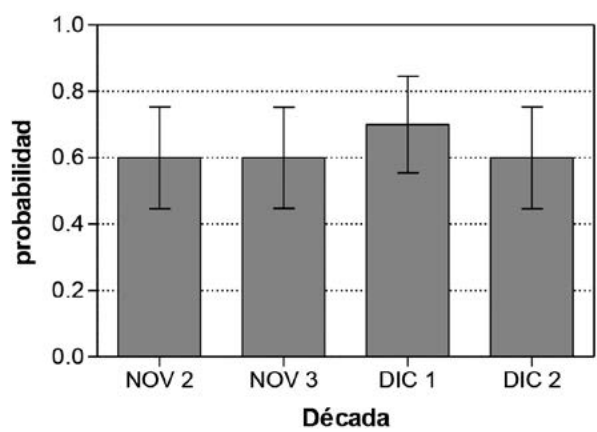


Figura 4. Probabilidad decádica de la ocurrencia de al menos 1 evento pluviométrico mayor a 10 mm. Datos de la estación meteorológica EEA Balcarce período 1970-2010. N2, N3, D1, y D2 representan la segunda y tercera década de noviembre y la primera y segunda década de diciembre. Las barras verticales indican el intervalo de confianza para cada valor de probabilidad.

Figure 4. Decadal probability to occurrence at least 1 pluviometric event greater than 10 mm. Data from EEA Balcarce weather station, 1970-2010 period. N2, N3, D1, and D2 indicate second and third November and first and second decadal December, respectively. Vertical bars indicate confidence interval for each probability value.

en estadios avanzados con el objetivo de corregir aplicaciones de N sub-optimas en estadios previos (siembra y V6).

En síntesis, para dos años en donde las precipitaciones luego de la aplicación de N permitieron la incorporación del N en el perfil del suelo, el potencial de pérdidas de N por volatilización en aplicaciones postsiembra de 80 kg N ha⁻¹ no sería elevado. La ERN desde el fertilizante aplicado no difirió entre fuentes de N, indicando que la dinámica de este nutriente fue similar, incluso cuando se aplicó urea en superficie. Por otra parte, aunque la respuesta a N solo se determinó en un solo año, la fertilización puede demorarse hasta V10 sin afectar el status nitrogenado del cultivo hacia el período crítico de determinación de número de granos y el rendimiento del cultivo. Finalmente, dada la alta probabilidad de precipitaciones durante el periodo vegetativo, los pronósticos meteorológicos de corto plazo permitirían programar la fertilización previo a una lluvia para lograr una rápida incorporación del N al suelo.

CONCLUSIONES

Para Balcarce y bajo las condiciones en que se desarrolló este experimento, las aplicaciones de N retrasadas (V6 o V10) y la utilización de fuentes con diferente potencial de volatilización (Urea, CAN, UAN, UAN+T) no afectaron el rendimiento, la acumulación de N, ni la ERN del cultivo de maíz bajo SD.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo fue financiado por el Proyecto Nacional Suelos 113424 del INTA y AGR526/17 de la FCA-UNMdP.

BIBLIOGRAFÍA

- AAPRESID. 2015. Estimación de superficie en siembra directa Campaña 2014-2015 Santiago Nocelli Pac. < <https://www.aapresid.org.ar/wp-content/uploads/2016/10/Estimaci%C3%B3n-de-superficien-en-SD-1.pdf> > [Consulta: mayo 2015]
- Andrade, FH; LAN Aguirrezábal & RH Rizzalli. 2000a. Crecimiento y rendimiento comparados. En: Andrade, FH & VO Sadras (eds.). Bases para el manejo del maíz, el girasol y la soja. E.E.A. Balcarce INTA – FCA, UNMdP. Balcarce, Argentina. pp. 61-96.
- Andrade, FH; HE Echeverría, NS Gonzalez & SA Uhart. 2000b. Requerimientos de nutrientes minerales. En: Andrade, FH & VO Sadras (eds.). Bases para el manejo del maíz, el girasol y la soja. E.E.A. Balcarce INTA – FCA, UNMdP. Balcarce, Argentina. pp. 207-231.
- Barbieri, PA; HE Echeverría & HR Sainz Rozas. 2003. Respuesta del cultivo de maíz bajo siembra directa a la fuente y al método de aplicación de nitrógeno. Ciencia del Suelo 21:18-23.
- Barbieri, PA; HE Echeverría & HR Saíenz Rozas. 2008. Presidedress soil nitrogen test for no-tillage maize at different row spacing. Agron. J. 100, 1101-1105.
- Barbieri, PA; HE Echeverría & HR Sainz Rozas. 2017. Pérdidas por volatilización y eficiencia de uso de nitrógeno en maíz en función de la fuente, dosis y momento de aplicación. Rev. Fac. Agron. (enviado)
- Blevins, RL & WW Frye. 1993. Conservation Tillage: An Ecological Approach to Soil Management. Adv. Agron. 51:33-78.
- Della Maggiora, AI; A Irigoyen; JM Gardiol; OP Caviglia & L Echarte. 2003. Evaluación de un modelo de balance de agua en el suelo para el cultivo de maíz. Revista Argentina de Agrometeorología. 2:167-176.
- Domínguez, GF; GA Studdert; HE Echeverría & FH Andrade. 2001. Sistemas de cultivo y nutrición nitrogenada en maíz. Ciencia del Suelo. 19:47-56.
- Echeverría, HE & J Ferrari. 1993. Relevamiento de algunas características de los suelos agrícolas del sudeste bonaerense. INTA, Estación Experimental Agropecuaria Balcarce, Argentina. Boletín Técnico N° 112. 18 p.
- Echeverría, HE & HR Sainz Rozas. 2001. Eficiencia de recuperación del nitrógeno aplicado al estadio de seis hojas del maíz bajo riego en siembra directa y labranza convencional. Ciencia del Suelo. 19:57-66.
- Echeverría, HE; HR Sainz Rozas & PA Barbieri. 2015. Maíz y sorgo. En: Echeverría, HE & FO García (eds.) 2ª edición. Fertilidad de Suelos y Fertilización de Cultivos. INTA, Buenos Aires, Argentina. pp. 435-478.
- Echeverría, HE & HR Sainz Rozas. 2015. Nitrógeno. En: Echeverría, HE & FO García (eds.) 2ª edición. Fertilidad de Suelos y Fertilización de Cultivos. INTA, Buenos Aires, Argentina. pp. 189-228.
- Fontanetto, H; H Vivas; O Kéller & J Romera. 2002. Evaluación de la volatilización de amoníaco desde diferentes fuentes nitrogenadas en soja con siembra directa. II Congreso Brasileiro de Soja. Mercosoja 2002. Resumos:229.
- Fontanetto, H & O Keller. 2006. Manejo de la fertilización en Maíz. Experiencias en la Región Pampeana Argentina. En: Información Técnica de Cultivos de Verano Campaña 2006. INTA EEA Rafaela. Publicación Miscelánea N° 106. pp 85-113.
- Ferraris, GN; G Elias & ML Galetto, 2014. Pérdidas de nitrógeno por volatilización en maíces tardíos en Pergamino (Bs As). Efectos de fuente y dosis. Actas X Congreso Nacional de maíz. Rosario, Santa Fe. 3-5 de septiembre 2014
- Fox, RH & VA Bandel. 1986. Nitrogen utilization with no-tillage In: Sprage, MA & G.B. Triplett (eds.). No-Tillage and Surface-Tillage Agriculture. The Tillage Revolution. John Wiley and Sons, New York USA. Pp. 117-255.
- García, FO; KP Fabrizio; LI Picone & JF Justel. 1999. Volatilización de amonio a partir de fertilizantes nitrogenados aplicados superficialmente bajo siembra directa y labranza convencional en Argentina. Actas 14º Congreso Latinoamericano de la Ciencia del Suelo. Pucón.
- Hargrove, WL. 1988. Soil, environmental, and management factors influencing ammonia volatilization under Field conditions. In: Bock, BR & DE Kissel (ed). Bulletin Y-206. National fertilizer Development Center, Tennessee Valley Authority, Muscle Shoals, Alabama. 2:17-36.
- Jokela, WE & GW Randall. 1997. Fate of Fertilizer Nitrogen as Affected by Time and Rate of Application on Corn. Soil Sci. Soc. Am. J. 61:1695-1703

- Navarro, CA; HE Echeverría; NS González & MA Iglesias. 1980. Cinética de las reacciones de amonificación y nitrificación en algunos suelos de la Argentina. IX Reunión Argentina de la Ciencia del Suelo. Paraná. 15-20/9/1980. Actas 431-437.
- Ritchie, SW & JJ Hanway. 1982. How a maize plant develops. Iowa State Univ. of Science and Technology. Ames, IA. Coop. Ex. Service Spec. Rep. 48.
- Russelle, MP; RD Hauck, & RA Olson. 1983. Nitrogen Accumulation Rates of Irrigated Maize. *Agron. J.* 75: 593-598.
- SAS, Institute. 2008. The SAS system for windows. Version 9.2. SAS Institute, Cary, NC.
- Sainz Rozas, HR; HE Echeverría; GA Studdert & FH Andrade 1997. Volatilización de amoníaco desde urea aplicada al cultivo de maíz bajo siembra directa. *Ciencia del Suelo* 15:12-16.
- Sainz Rozas, HR; HE Echeverría & PA Barbieri. 2004. Nitrogen balance is affected by application time and nitrogen fertilizer rate in irrigated no-tillage maize in Argentina. *Agron. J.* 96: 1622-1631
- Sainz Rozas, HR; HE Echeverría & HP Angelini. 2011. Niveles de materia orgánica y de pH en suelos agrícolas de la región pampeana y extrapampeana Argentina. *Ciencia del Suelo* 29:29-37
- Scharf, PC; WJ Wiebold & JA Lory. 2002. Corn Yield Response to Nitrogen Fertilizer Timing and Deficiency Level. *Agron. J.* 94:435-441.
- Studdert, GA; HE Echeverría & EM Casanovas. 1997. Crop-pasture rotation for sustaining the quality and productivity of a Typic Argiudoll. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 61:1466-1472.
- Studdert, GA & HE Echeverría. 2000. Crop Rotations and Nitrogen Fertilization to Manage Soil Organic Carbon Dynamics. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 64:1496-1503.
- Studdert, GA & HE Echeverría. 2002. Agricultura continua, labranzas y carbono orgánico en la capa arable en el sudeste bonaerense. En: Actas de 18º Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. Puerto Madryn, Chubut, Argentina. En CD.
- Uhart, SA & FH Andrade. 1995. Nitrogen Deficiency in Maize: II. Carbon-Nitrogen interaction effects on kernel number and grain yield. *Crop Sci.* 35: 1384-1389.
- Uhart, SA & HE Echeverría. 2000. Diagnóstico de la fertilización. En: Andrade, FH & VO Sadras (eds.). Bases para el manejo del maíz, el girasol y la soja. E.E.A. Balcarce INTA – FCA, UNMdP. Balcarce, Argentina. pp. 235-268.